

Комбинированная обмотка «славянка»

АФАНАСЬЕВ А.А., НИКИТИН В.М., ТОКМАКОВ Д.А.

Магнитодвижущая сила (МДС) обычной симметричной трёхфазной обмотки содержит высшие гармоники порядков $\nu=6k \pm 1, k=1,2,3,\dots$. В МДС комбинированной обмотки гармоники с нечетными номерами $k=2n-1, n=1,2,3,\dots$ составляющие половину указанных гармоник, отсутствуют. Она содержит оставшиеся высшие гармоники тех же порядков $\nu=6k \pm 1$ только с четными номерами $k=2n, n=1,2,3,\dots$ причем амплитуды этих гармоник практически совпадают с амплитудами аналогичных гармоник обычной обмотки, порождающей комбинированную. Поэтому кривая МДС комбинированной обмотки ближе к синусоиде по сравнению с кривой МДС классической обмотки. Электрические машины с комбинированной обмоткой будут иметь пониженный уровень добавочных потерь в активных материалах статора и ротора. У вентиляльных машин с комбинированной обмоткой статора уровень вибрации и шума меньше из-за снижения более чем в два раза амплитуды пульсаций электромагнитного момента, при этом частота пульсаций удваивается.

Ключевые слова: комбинированная обмотка, гармоники, магнитодвижущая сила, кривая МДС, пульсации электромагнитного момента

Трёхфазная обмотка, названная «славянкой», состоит из двух обмоток – первая соединяется по схеме «звезда», вторая, сдвинутая относительно первой на 30° , – по схеме «треугольник». Если число витков в фазе второй обмотки в $\sqrt{3}$ больше, чем у первой, то при одинаковых значениях плотности тока в проводниках обеих обмоток их линейные значения токов и напряжений будут также одинаковыми, а одноимённые зажимы могут быть общими. Получаем комбинированную обмотку «звезда в треугольнике» (рис. 1) [1–3].

Опытные исследования асинхронных двигателей с такой обмоткой показывают улучшение КПД, коэффициента мощности, снижение вибрации и шума [4, 5]. Электрические машины с обмоткой «славянка» становятся (по зарубежным и российским источникам) энергосберегающими.

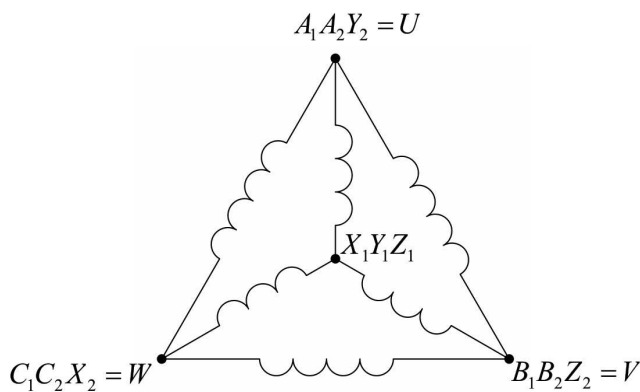


Рис. 1. Комбинированная обмотка, состоящая из двух обмоток: $A_j = X_j; B_j = Y_j; C_j = Z_j; j = 1, 2$

Рассмотрим особенности формирования обмоткой «славянка» магнитодвижущей силы (МДС) магнитного поля в воздушном зазоре машины и электромагнитного момента.

Анализ МДС комбинированной обмотки. Известно, что МДС симметричной трехфазной обмотки можно представить двумя совокупностями высших гармонических составляющих с номерами ν [6]:

$${}^1 F_{\nu x} = F_{A\nu x} + F_{B\nu x} + F_{C\nu x} = F_{\nu \max} \sin(\omega t + \nu \pi x / \tau), \tag{1}$$

где $\nu=6k-1, k=1,2,3,\dots$;

$${}^2 F_{\nu x} = F_{A\nu x} + F_{B\nu x} + F_{C\nu x} = F_{\nu \max} \sin(\omega t - \nu \pi x / \tau), \tag{2}$$

где $\nu=6k+1, k=1,2,3,\dots$

Высшие гармоники с остальными нечётными номерами, кратными трём ($\nu=3k, k=1,2,3,\dots$), отсутствуют.

Здесь обозначено:

$$F_{\nu \max} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{w}{p} I \frac{k_{p\nu} k_{y\nu}}{\nu}; \tau - \text{полюсное деление}; \tag{3}$$

$$k_{p\nu} = \frac{\sin(q' \alpha' \nu / 2)}{q' \sin(\alpha' \nu / 2)} - \text{коэффициент распределения}; \tag{4}$$

$$k_{y\nu} = \sin\left(\nu - \frac{y \pi}{\tau 2}\right) - \text{коэффициент укорочения}; \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{z} p - \text{угол сдвига соседних пазов в магнитном поле}; \tag{6}$$

α' – угол сдвига соседних катушек катушечной группы в каждой обмотке; (7)

$q' = \frac{z}{4pm} = \frac{z}{12p}$ – число пазов на полюс и фазу в каждой обмотке; (8)

$q = 2q'$ – число пазов на полюс и фазу в объединённой обмотке; (9)

I, w – ток и число витков соответствующей обмотки, причём

$$I^Y = \sqrt{3}I^\Delta; w^Y = w^\Delta / \sqrt{3}; I^Y w^Y = I^\Delta w^\Delta; \quad (10)$$

также справедливо

$$k_{pv}^Y = k_{pv}^\Delta = k_{pv}; k_{yv}^Y = k_{yv}^\Delta = k_{yv};$$

$$F_{v \max}^Y = F_{v \max}^\Delta = F_{v \max}. \quad (11)$$

Гармоники первой совокупности согласно формуле (1) перемещаются со скоростью $\frac{dx}{dt} = v_v = -\frac{\omega\tau}{\pi\nu}$ встречно направлению перемещения основной гармоники $\frac{dx}{dt} = v_1 = \frac{\omega\tau}{\pi}$, гармоники второй совокупности (2) перемещаются со скоростью $\frac{dx}{dt} = v_v = \frac{\omega\tau}{\pi\nu}$ в направлении основной гармоники.

Первая совокупность гармонических составляющих с номерами $\nu = 6k - 1, k = 1, 2, 3, \dots$, вызванная обеими обмотками,

$${}^1 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left[\omega t - \frac{\pi}{6} + \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \nu \frac{\pi}{6}\right)\right] \right\}. \quad (12)$$

Вторая совокупность гармонических составляющих с номерами $\nu = 6k + 1, k = 1, 2, 3, \dots$, также вызванная обеими обмотками,

$${}^2 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left[\omega t - \frac{\pi}{6} - \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \nu \frac{\pi}{6}\right)\right] \right\}. \quad (13)$$

Несложно убедиться, что для нечётных чисел $k = 2n - 1 (n = 1, 2, 3, \dots)$

$${}^1 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left[\omega t + \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \pi\right)\right] \right\} = 0; \quad (14)$$

$${}^2 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left[\omega t - \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} + \pi\right)\right] \right\} = 0, \quad (15)$$

т.е. гармоники МДС с номерами $\nu = 5$ и $7, 17$ и $19, 29$ и 31 и т.д. будут находиться в противофазе, вследствие чего пропадают.

Для чётных чисел ($k = 2n (n = 1, 2, 3, \dots)$) из (12), (13) получим:

$${}^1 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau} - 2\pi\right) \right\} =$$

$$= 2F_{v \max} \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right); \quad (16)$$

$${}^2 F_{\nu \max}^\Sigma = F_{\nu \max}^Y + F_{\nu \max}^\Delta = F_{v \max} \times$$

$$\times \left\{ \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau} + 2\pi\right) \right\} =$$

$$= 2F_{v \max} \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right), \quad (17)$$

т.е. гармоники МДС с номерами $\nu = 11$ и $13, 23$ и $25, 35$ и 37 и т.д. будут находиться в фазе друг к другу и могут рассматриваться как одна гармоника с удвоенной амплитудой.

Оценим значения амплитуд высших гармонических комбинированной обмотки ($F_{v \max}$) и обычной обмотки ($\hat{F}_{v \max}$), уложенной в тех же пазах. Для обычной обмотки справедливо

$$\hat{F}_{v \max} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\hat{w}}{p} I \frac{\hat{k}_{pv} k_{yv}}{\nu}, \quad (18)$$

где $\hat{w} = 2w; \hat{k}_{pv} = \frac{\sin(q\alpha\nu/2)}{q \sin(\alpha\nu/2)}$.

Считая $\alpha' = \alpha$, имеем

$$\frac{2F_{v \max}}{\hat{F}_{v \max}} = \frac{1}{\cos \frac{\nu q \alpha}{4}}. \quad (19)$$

Например, применительно к комбинированной обмотке, образованной из обычной обмотки ($z = 24, 2p = 4, q = 2$ и $\alpha = \pi/6$), для гармоник МДС с номерами $\nu = 11$ и $13, 23$ и $25, 35$ и 37 и т.д. из (19) получим

$$\frac{2F_{v \max}}{\hat{F}_{v \max}} = -1,035.$$

Или другой пример обычной обмотки: $z = 72, 2p = 6, q = 4$ и $\alpha = \pi/12$. Вычисления по (19) для тех же гармоник дают аналогичный результат:

$$\frac{2F_{v \max}}{\hat{F}_{v \max}} = -1,035.$$

Следовательно, амплитуды гармоник комбинированной обмотки практически совпадают с ам-

плитудами аналогичных гармоник обычной обмотки, порождающей комбинированную, а так как согласно формулам (14), (15) половина гармоник (причём на одну ступень более низких порядков) у комбинированной обмотки отсутствует, то её результирующая кривая МДС существенно ближе к синусоиде.

Кривую МДС комбинированной обмотки для фиксированного момента времени можно получить, суммируя (12), (13) и добавляя к получаемой сумме МДС основных (первых) гармоник каждой из двух обмоток:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{лхв}} &= {}^1 F_{\text{лхв}}^{\Sigma} + {}^2 F_{\text{лхв}}^{\Sigma} + F_{1\text{max}} \sin(\omega t - \pi x / \tau) + \\
 &+ F_{1\text{max}} \sin[\omega t - \pi / 6 - (\pi x / \tau - \pi / 6)] = \\
 &= {}^1 F_{\text{лхв}}^{\Sigma} + {}^2 F_{\text{лхв}}^{\Sigma} + 2 F_{1\text{max}} \sin(\omega t - \pi x / \tau), \quad (20)
 \end{aligned}$$

По (20) на рис. 2 и 3 построены кривые МДС для момента времени $t=0$ двух обмоток. Видим, что кривые комбинированных обмоток более близки по форме к синусоиде.

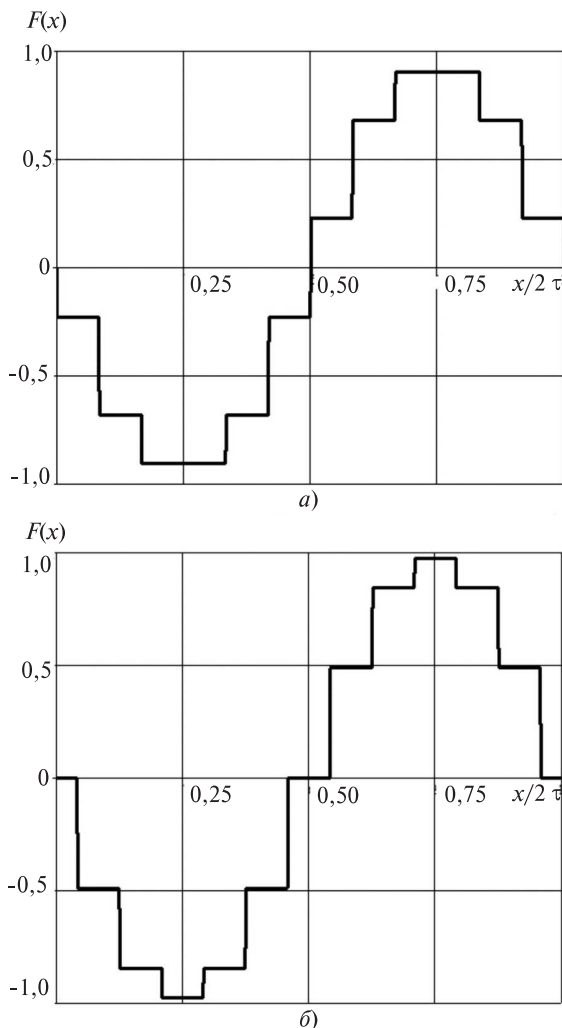


Рис. 2. Кривые МДС порождающей (а) и комбинированной (б) обмоток, имеющих числа полюсов и пазов $2p = 4$ и $z = 24$

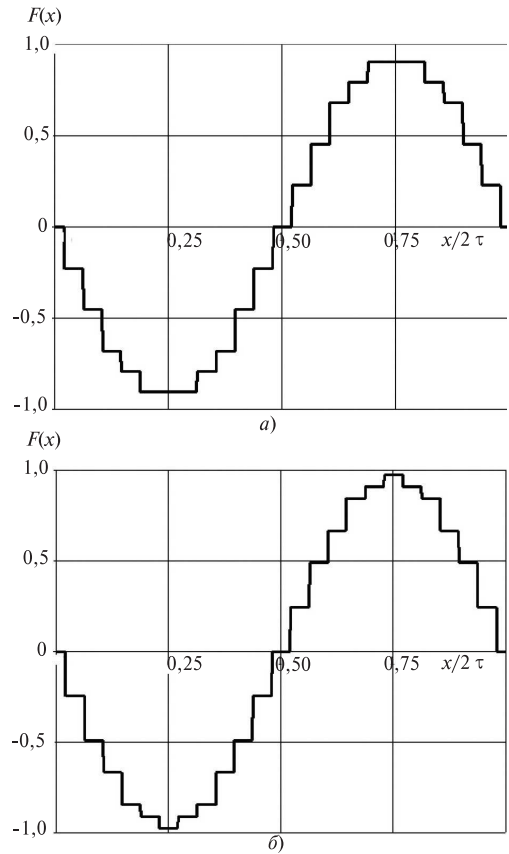


Рис. 3. Кривые МДС порождающей (а) и комбинированной (б) обмоток, имеющих числа полюсов и пазов $2p = 6$ и $z = 72$

Формирование электромагнитного момента вентильного двигателя с комбинированной обмоткой.

Несинусоидальный характер напряжений и токов вентильного двигателя вызывает пульсации его электромагнитного момента. Переменная составляющая электромагнитного момента вентильного двигателя с инвертором тока может быть определена по формуле [7]:

$$\begin{aligned}
 \Delta M &= \frac{3}{2} p [(\Psi_{d0} - L_d'' I_{d0}) \Delta i_q + (-\Psi_{q0} + L_d'' I_{q0}) \Delta i_d + \\
 &+ (L_d'' - L_q'') \Delta i_d \Delta i_q], \quad (21)
 \end{aligned}$$

где $\Psi_{d0} = -L_{ad} I_{f0} + L_d I_{d0}$; $\Psi_{q0} = L_q I_{q0}$;

$$\begin{aligned}
 \Delta i_d &= \sum_{k=1}^{\infty} [a_{6k-1} \cos(6k\omega t + \vartheta_1) + a_{6k+1} \cos(6k\omega t - \vartheta_1)]; \\
 a_{6k\pm 1} &= \pm I_{m1} \frac{\sin(6k \pm 1)\gamma / 2}{(6k \pm 1)^2 \sin \gamma / 2}; \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta i_q &= \sum_{k=1}^{\infty} [-a_{6k-1} \sin(6k\omega t + \vartheta_1) + a_{6k+1} \sin(6k\omega t - \vartheta_1)]; \\
 \vartheta_1 &= \pm \pi / 2 - (\varphi_1 + \theta); \quad (23)
 \end{aligned}$$

φ_1 — угол между первыми гармониками напряжения и тока якоря; знак (+) для угла ϑ_1 соответствую-

ет двигательному режиму, (–) – генераторному; I_{m1} – амплитуда первой гармоники тока якоря; γ – угол коммутации инвертора.

По (21) построена кривая $\Delta M = \Delta M(t)$, приведенная на рис. 4, для вентильного двигателя мощностью 75 кВт, выполненного на базе серийного восьмиполусного синхронного двигателя ДС-102-8 с линейным напряжением 380 В, током 141 А и обмоткой статора по схеме «звезда», работающего в номинальном режиме. Видим, что размах пульсаций электромагнитного момента составляет примерно 60 Н·м, что составит 6,3% номинального момента.

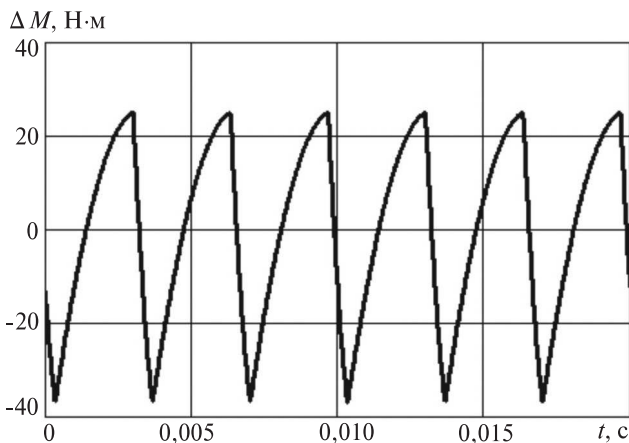


Рис. 4. Пульсации электромагнитного момента вентильного двигателя с классической обмоткой статора

При выполнении этого двигателя с комбинированной обмоткой статора получим две элементарные машины половинной мощности, у которых обмотки смещены на 30° , а токи имеют такой же фазовый сдвиг.

Переменные осевые значения токов второй элементарной машины вычисляются по формулам:

$$\Delta i_d = \sum_{k=1}^{\infty} \{a_{6k-1} \cos[6k(\omega t - \pi/6) + \vartheta_1] + a_{6k+1} \cos[6k(\omega t - \pi/6 - \vartheta_1)]\}; \quad (24)$$

$$\Delta i_q = \sum_{k=1}^{\infty} \{-a_{6k-1} \sin[6k(\omega t - \pi/6) + \vartheta_1] + a_{6k+1} \sin[6k(\omega t - \pi/6 - \vartheta_1)]\}. \quad (25)$$

При подстановке (24) и (25) в формулу (21) для переменной составляющей момента получим зависимость, показанную на рис. 5. Видим, что число пульсаций момента на периоде переменного тока увеличилось вдвое по сравнению с рис. 4, но размах пульсаций уменьшился примерно до 24 Н·м (в 2,5 раза) и составил 2,5% номинального момента.

Условия возможности выполнения трёхфазной комбинированной обмотки. Не у всякой трёхфазной

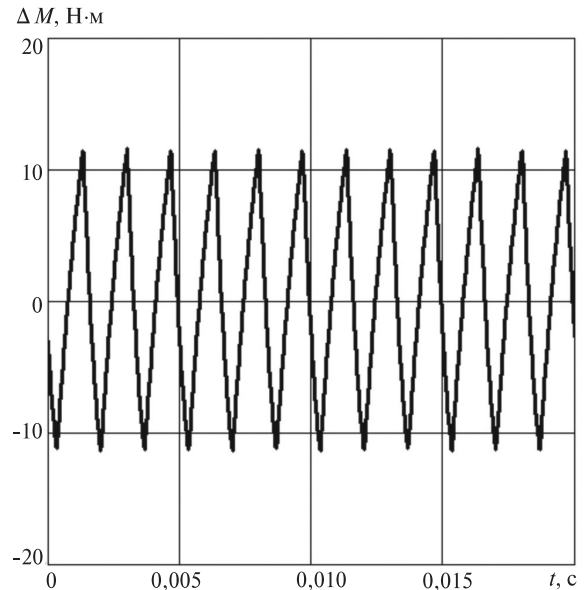


Рис. 5. Пульсации электромагнитного момента вентильного двигателя с комбинированной обмоткой статора

электрической машины классическая обмотка может быть заменена комбинированной. Исходная (порождающая) обмотка должна соответствовать единственному условию – число пазов на полюс и фазу должно быть чётным:

$$q = z / 2pm. \quad (26)$$

В этом случае, во-первых, заполненные катушечные группы могут быть разделены на две части, из которых первая образует обмотку, соединённую в «звезду», а вторая – обмотку, соединённую в «треугольник»; во-вторых, угол сдвига в магнитном поле катушечных групп этих обмоток (а значит, и самих обмоток) становится равным 30° . Действительно, если угол сдвига двух соседних зубцов в магнитном поле

$$\alpha = 360p / z, \quad (27)$$

то в соответствии с (26) и (27) угол между двумя обмотками будет равен

$$\alpha q / 2 = 90 / m = 30^\circ. \quad (28)$$

Например, четырехполусная обмотка с $z=24$, имеющая $q=2$, а также шестиполусные обмотки с $z=36$ и $z=78$, имеющие значение q соответственно 2 и 4, могут быть выполнены в комбинированном формате. А вот шестиполусная обмотка с $z=54$ и $q=3$ не может быть преобразована в комбинированную обмотку.

Многофазные комбинированные обмотки. В электрических машинах, питающихся от полупроводниковых преобразователей частоты, начинают применяться многофазные обмотки статора с числом фаз более трёх. Такие машины отличаются меньшими значениями фазных токов, лучшими усло-

виями работы силовых транзисторов, повышенной надёжностью, лучшими пусковыми свойствами [8, 9]. Наиболее исследованы конструкции многофазных асинхронных двигателей, имеющих 5, 6, 9, 12 и 15 фаз статора [9–11]. Возможны два варианта выполнения комбинированных многофазных обмоток с наполовину прореженным составом высших гармоник МДС:

обмотка состоит из двух одинаковых обмоток, сдвинутых в магнитном поле на 30° , питающихся от двух преобразователей частоты и имеющих временной сдвиг фаз также на 30° ;

обмотка состоит из двух одинаковых обмоток, сдвинутых в магнитном поле на 30° , имеющих общие зажимы и питающихся от одного преобразователя частоты.

Очевидно, первый вариант наиболее доступен для реализации, так как не нуждается в перемотке одной из обмоток с целью обеспечения равенства линейных напряжений; требуемый сдвиг обмоток достигается выбором чисел зубцов, полюсов и фаз.

Комбинированную обмотку второго типа можно выполнить только при числе фаз, равном трём. Например, шестифазная обмотка имеет одинаковые фазные и линейные напряжения, следовательно, у двух обмоток, соединённых в виде шестифазной звезды и шестиугольника, могут быть общие зажимы. Однако сдвиг одноимённых фаз этих обмоток составляет 60° . В этом случае высшие гармоники МДС обеих обмоток с номерами $\nu = 6k \mp 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$ при всех значениях k не находятся в противофазе и, будучи одинаковыми, суммируются, следовательно, прореживание высших гармоник отсутствует.

Многофазные комбинированные обмотки вентильно-машинных систем с числом обмоток, кратным трём, можно выполнить и с одним преобразователем частоты, если многоугольное замыкание фаз заменить совокупностью фаз, включённых по схеме «звезда» и «треугольник». В этом случае сдвиг одноимённых фаз, принадлежащих соответственно «звезде» и «треугольнику», составит 30° . Например, схема шестифазной обмотки может иметь два различных «треугольника» и по «звезде» внутри каждого из них.

Выводы. 1. Обычная симметричная трёхфазная обмотка содержит высшие гармоники МДС порядков $\nu = 6k \pm 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$. У комбинированной трёхфазной обмотки отсутствуют гармоники с нечётными номерами $k = 2n - 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$, составляющие половину указанных гармоник.

2. Комбинированная трёхфазная обмотка содержит оставшиеся высшие гармоники тех же порядков $\nu = 6k \pm 1$ только с чётными номерами $k = 2n$,

$n = 1, 2, 3, \dots$, причем их амплитуды практически совпадают с амплитудами аналогичных гармоник обычной обмотки, порождающей комбинированную обмотку. Поэтому кривая МДС комбинированной обмотки ближе к синусоиде по сравнению с классической обмоткой.

3. Электрические машины с комбинированной обмоткой, имеющей наполовину прореженный состав высших гармоник МДС, имеют пониженный уровень добавочных потерь в активных материалах статора и ротора.

4. Вентильные машины с комбинированной обмоткой статора будут иметь меньший уровень вибрации и шума из-за снижения более чем в два раза амплитуды пульсаций электромагнитного момента, при этом частота пульсаций удваивается.

5. Для многофазных электрических машин с сетевым питанием наиболее предпочтительны комбинированные обмотки с отдельным питанием от двух преобразователей частоты с временным сдвигом фаз на 30° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кастен Х., Хофманн В.** Электрические машины с более высокой эффективностью за счёт совмещения функций «звезда–треугольник» обмотки. Электрические машины и привод. — IEEE Международная конференция (IEMDC), 2011.
2. **Motor Management Truths and Consequences: Understanding Electric Motor Rewinds and Efficiency** Tom Bishop, P.E. Electrical Apparatus Service Association, Inc. St. Louis, MO. MDM Webcast, May 25, 2011.
3. **Dennis Bowns, Erin Hope.** Green Motor Initiative Rewind Savings. December 11, 2012: http://www.greenmotors.org/documents/_RTFSubmittal_12_11_2012h.pdf
4. **Змиева К.А., Яковлев А.П.** Оптимизация линейки энерго-сберегающих асинхронных двигателей с габаритами от 100 до 132 с совмещёнными обмотками. — Электротехника, 2014, № 7, с. 32–35.
5. **Дейнего В., Дуюнов Д., Иванов В.** Изменение конструкции обмоток асинхронных электродвигателей — потенциал обеспечения надёжности электросетей. — Россети, 2015, № 2 (29), с. 42–49.
6. **Сергеев П.С.** Электрические машины. — М.: Госэнергоиздат, 1962, 280 с.
7. **Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликин М.Г.** Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. — М.: Энергия, 1977, 224 с.
8. **Бражников А.В., Белозеров И.Р., Рафальский И.И.** Многофазный асинхронный инверторный электропривод с улучшенными пусковыми качествами. — Современные наукоемкие технологии, 2010, № 7, с. 133–137.
9. **Глухов, Д.М., Муравлева О.О.** Моделирование работы многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах эксплуатации. — Томск: Известия Томского политехнического университета, 2005, т. 308, № 7, с. 139–142.
10. **Khan M.R., Iqbal A., Ahmed Sk.M., Moinuddin S., Payami S.** Multi-phase alternative current machine winding design. — International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, vol. 2, No. 10, pp. 79–86.
11. **Livadaru, L., Nutescu C., Munteanu A., Simion A., Cojan M.** Comparative FEM-based Analysis of Multiphase Induction

Motor. – Analele Universitatii. – Eftimie Murgui Resita Anul XXI, 2014, No. 2, pp. 223–230.

[06.06.2016]

А в т о р ы : **Афанасьев Александр Александрович** окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. Докторскую диссертацию «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты (теория и приложения)» защитил в МЭИ в 1991 г. Профессор кафедры автоматики и управления в технических системах Чувашского государственного университета (ЧГУ).

Никитин Владимир Михайлович окончил электротехнический факультет Куйбышевского индустриального института в 1960 г. Кандидатскую диссертацию «Анализ и синтез структур вентильного электропривода постоянного тока» защитил в 1974 г. Заместитель начальника отдела электропривода и электрических машин ЗАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (ЧЭАЗ).

Токмаков Дмитрий Анатольевич окончил Казанский авиационный институт в 1989 г. Технический директор ЗАО «ЧЭАЗ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 6, pp. 53–58

DOI:10.24160/0013-5380-2017-6-53-58

A Slavyanka-Type Combined Winding

AFANAS'YEV Aleksandr A. (Chuvash State University, Cheboksary, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

NIKITIN Vladimir M. (JSC «Cheboksary Electroapparatus Plant» – «ChEP») – Deputy Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

ТОКМАКОВ Dmitrii A. (JSC «ChEP», Cheboksary, Russia) – Technical Director

The magnetomotive force (MMF) of a usual symmetrical three-phase winding contains higher harmonic components of the orders $v=6k\pm 1$, $k=1,2,3,\dots$. The MMF of the combined winding does not contain harmonic components with the odd numbers $k=2n-1$, $n=1,2,3,\dots$, which make half of the above-mentioned harmonic components. This MMF contains the remaining higher harmonics of the same orders $v=6k\pm 1$, but only with the even numbers $k=2n$, $n=1,2,3,\dots$. The amplitudes of these harmonic components are almost identical with the amplitudes of similar harmonic components generated by a conventional winding that produces the combined one. Therefore, the MMF curve of the combined winding is closer to a sinusoidal waveform as compared with the MMF waveform generated by the classic winding. Electrical machines fitted with a combined winding will have a lower level of additional losses in the active materials of rotor and stator. Switched machines fitted with a combined stator winding will produce lower levels of vibration and noise due to more than half as high amplitude of electromagnetic torque pulsations, which also have twice as high frequency.

Key words: combined winding, harmonic components, magnetomotive force, MMF waveform, electromagnetic torque pulsations

REFERENCES

1. **Kasten Kh., Khofmann V.** *Elektricheskiye mashiny s boleye vysokoi effektivnost'yu za schet sovmeshcheniya funktsii «zvezda – treugol'nik» obmotki.* – IEEE Mezhdunarodnaya konf. «Elektricheskiye mashiny i privod» (IEMDC) (Electrical Machines with Higher Efficiency through Combined Star-Delta Windings. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)), 2011.
2. **Motor Management Truths and Consequences: Understanding Electric Motor Rewinds and Efficiency** Tom Bishop, P.E. Electrical Apparatus Service Association, Inc. St. Louis, MO. MDM Webcast, May 25, 2011.
3. **Dennis Bowns, Erin Hope.** Green Motor Initiative Rewind Savings. December 11, 2012: http://www.greenmotors.org/documents/_RTFSubmittal_12_11_2012h.pdf
4. **Zmiyeva K.A., Yakovlev A.P.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2014, No. 7, pp. 32–35.
5. **Deinego V., Duyunov D., Ivanov V.** *Rosseti – in Russ. (Russian networks)*, 2015, No. 2 (29), pp. 42–49.
6. **Sergeyev P.S.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 280 p.

7. **Arakelyan A.K., Afanas'yev A.A., Chilikin M.G.** *Ventil'nyi elektroprivod s sinkhronnym dvigatelem i zavisimym invertorom* (Valve electric drive with synchronous motor and dependent inverter). Moscow, Publ. «Energiya», 1977, 224 p.

8. **Brazhnikov A.V., Belozero I.R., Rafal'skii I.I.** *Sovremennye naukoemkiye tekhnologii – in Russ. (Modern high technology)*, 2010, No. 7, pp. 133–137.

9. **Glukhov D.M., Muravleva O.O.** *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – in Russ. (News of the Tomsk Polytechnical University)*, 2005, vol. 308, No. 7, pp. 139–142.

10. **Khan M.R., Iqbal A., Ahmed Sk.M., Moinuddin S., Payami S.** Multi-phase alternative current machine winding design. – International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, vol. 2, No. 10, pp. 79–86.

11. **Livadaru, L., Nutescu C., Munteanu A., Simion A., Cojan M.** Comparative FEM-based Analysis of Multiphase Induction Motor. – Analele Universitatii. – Eftimie Murgui Resita Anul XXI, 2014, No. 2, pp. 223–230.

[06.06.2016]